

Determination of Soil Active Organic Carbon Content and Its Influence Factors

Xingkai Wang¹, Xiaoli Wang^{1*}, Jianjun Duan², Shihua An¹

¹Agricultural College, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²College of Tobacco, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Email: 915379016@qq.com, *xlwang@gzu.edu.cn

Received: Sep. 29th, 2018; accepted: Oct. 16th, 2018; published: Oct. 23rd, 2018

Abstract

Soil active organic carbon is an important component of terrestrial ecosystems and an active chemical component in soil. It is of great significance in the study of terrestrial carbon cycle. Many studies have shown that soil active organic carbon can reflect the existence of soil organic carbon and soil quality change sensitively, accurately and realistically. In recent years, soil active organic carbon has become the focus and hot spot of research on soil, environment and ecological science. Soil active organic carbon can be characterized by dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (SMBC), mineralizable carbon (PMC), light organic carbon (LFC) and easily oxidized organic carbon (LOC). This paper reviews the determination methods and influencing factors of these five active organic carbons, and looks forward to the future research focus, laying the foundation for the scientific management of land and the effective use of soil nutrients.

Keywords

Soil Organic Carbon, Determination Methods, Influencing Factors

土壤活性有机碳的测定及其影响因素概述

王兴凯¹, 王小利^{1*}, 段建军², 安世花¹

¹贵州大学农学院, 贵州 贵阳

²贵州大学烟草学院, 贵州 贵阳

Email: 915379016@qq.com, *xlwang@gzu.edu.cn

收稿日期: 2018年9月29日; 录用日期: 2018年10月16日; 发布日期: 2018年10月23日

*通讯作者。

文章引用: 王兴凯, 王小利, 段建军, 安世花. 土壤活性有机碳的测定及其影响因素概述[J]. 土壤科学, 2018, 6(4): 125-132. DOI: 10.12677/hjss.2018.64016

摘要

土壤活性有机碳是陆地生态系统的重要组成成分，是土壤中活跃的化学组分，在陆地碳循环研究中具有非常重要的意义。很多的研究表明，土壤活性有机碳能够灵敏、准确、真实地反映土壤有机碳的存在状况以及土壤质量变化，近年来土壤活性有机碳已成为土壤、环境和生态科学领域所关注的焦点和研究的热点。土壤活性有机碳可用溶解性有机碳(DOC)、微生物量碳(SMBC)、可矿化碳(PMC)、轻组有机碳(LFC)和易氧化有机碳(LOC)表征。本文综述了这5种活性有机碳的测定方法和影响因素，并展望了今后的研究重点，为土地的科学管理和土壤养分的有效利用奠定基础。

关键词

活性有机碳，测定方法，影响因素

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

土壤覆盖面广，土壤碳库是仅次于海洋和地质库的全球第三大碳库，在全球碳循环中有着十分重大的地位，对空气中的 CO₂ 的含量影响很大[1]。土壤中储存了大量的有机碳，任何微小的环境变化都有可能对土壤碳库造成巨大影响，进而造成大气中二氧化碳浓度的巨大改变。因此，准确认识土壤有机碳的变化是农业生态系统保持可持续性发展的需要。然而，有着高背景值的土壤有机碳，在土壤管理措施、土地利用方式、气候变化的反应方面，都表现出了一定的滞后性，因此，在短时间内，要想检测出它所发生的微小变化是很不容易的。而活性有机碳主要含有大量的游离有机物，如根系分泌物、动植物残体、微生物生物量及其渗出物和真菌菌丝等，是很容易被微生物转化利用的非生物、生物的有机混合物[2] [3]。土壤活性有机碳并不是单纯的一种化合物，而是土壤中具有相似特性，即较高有效性的那部分有机碳[4]。虽然活性有机碳在土壤有机碳总量中所占比例较小，但是其能准确、真实和灵敏地反映出土壤质量和土壤有机碳存在状况的变化，能及时反映土壤的微小变化[5]。因此土壤活性有机碳具有很大研究潜力和研究价值，是目前以及未来几十年研究的焦点。

2. 土壤活性有机碳库的概念

根据碳库功能的差异，如化学属性、库的大小、不同周转时间等划分土壤有机碳库，将其分为慢性库、惰性库、活性库。在一定条件下，受微生物、植物影响很大，并且还具有一定溶解性，在土壤中移动比较迅速，不稳定、易氧化、矿化、分解，其空间位置、形态对植物、微生物来说，活性比较高的那一部分土壤碳素，被称为土壤活性有机碳库[6]。国外常描述为微生物生物量碳。

3. 土壤活性有机碳的表征及其测定方法

3.1. 溶解性有机碳 (Dissolved Organic Carbon)

溶解性有机碳主要包含土壤溶液中悬浮着的胶体状大分子量有机质，以及不同种类的低分子量有机物。广义的溶解性有机碳是指在用水、稀盐等提取剂提取后，用 0.45 μm 孔径滤膜过滤出来的有机碳，

因为土壤表面的吸附平衡能够被稀盐溶液所打破,并且释放出被矿物颗粒表面吸附的有机碳[7]。用渗漏计或吸杯来提取溶解性有机碳时,土壤溶液中能够通过 0.45 μm 直径滤膜的那部分有机碳,定义为狭义的溶解性有机碳,这部分溶解性有机碳主要来源于土壤中的大孔隙[8]。

对于溶解性有机碳的测定,有几种方法:

紫外分光光度法:使用 TOC 仪测定法获得 DOC 提取液,测定其原液的浓度并稀释至 5~15 mg/L,在 254 nm 波长下使用紫外分光光度计测得稀释液吸光度,最后利用浓度和吸光光度值建立回归方程计算结果[9]。

TOC 仪测定法:水溶性有机碳是以水作为提取剂提取出来的。提取操作:水土比为 10:1 的土样混合物置于容器中,恒温(温度为 25 $^{\circ}\text{C}$)间歇震荡 5 h,然后用离心机离心 10 min (离心机转速为 12,000 r/min),而后抽滤(0.45 μm 微孔滤膜)得到上清液[10],最后测定水溶性有机碳含量。

湿氧化法:采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 外加热氧化法进行测定[11]。首先吸取 10 mL 上清液于硬质消化管中(150 mL),加入 10 mL 0.10801/6 mol/L 重铬酸钾-15.7 mol/L 1/2 浓硫酸混合溶液,在消化管中加入玻璃珠 30 颗,油浴加热 5 min,加 3~4 滴邻啡罗啉指示剂后,用 0.05 mol/L 硫酸铁标准溶液进行滴定。

比色法:在试管(10 mL)中,加入提取液 0~5 mL,使有机碳含量为 0~25 mg,如果提取液不到 5 mL,加蒸馏水至 5 mL,然后加 2.5 mL 10 mol/L $\text{Mn(III)-H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 和 2.5 mL H_2SO_4 ,静置一小时后在波长为 500 nm 处进行比色[12]。

3.2. 微生物量碳(Soil Microbial Biomass Carbon)

SMBC 指在土壤中体积小于 $5 \times 10^3 \sim 10^5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ 活的土壤微生物、细菌、真菌和藻类体内所含的有机碳,在土壤有机质中易矿化且活性较高[13]。SMBC 在土壤碳库中所占比例为 1%~4% [14],虽然比例不大,却是土壤有效养分的重要库源。微生物量碳既可以直接也可间接的参与到土壤生物化学转化过程中,可通过 SMBC 来体现土壤总碳含量的变化。由于 SMBC 的周转速率较快,所以在评价土壤肥力和植物营养调控时具有重要的参考作用。SMBC 测定方法如下:

预培养:先将土壤中的枯枝残体清除,过 2 mm 筛备用。用去离子水调节土壤水分至田间持水量的 45%左右,称取 60 克样品于一次性塑料杯中,在密闭收纳箱中加入一定量的水以保持相对湿度恒定,置于 100 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱培养。

熏蒸:称取预培养处理新鲜土壤 12.5 g 至烧杯(50 mL),放在干燥器里并抽成真空,安放装有约 2/3 的去乙醇氯仿烧杯和稀 NaOH 溶液,以吸收释放出来的二氧化碳,在干燥器底部加入少量的水。开启真空泵,使烧杯中的氯仿沸腾 3~5 min,关闭干燥器阀门,避光条件储放一天。

提取:将熏蒸后的土壤转移至 100 mL 的塑料瓶,加入 50 mL 0.5 mol/L 硫酸钾溶液,转速为 300 r/min 震荡 30 min,然后过滤,同时做对照。用 TOC 碳自动测定仪测定熏蒸和未熏蒸的土壤提取液中的有机碳含量,最后进行计算[15] [16]。

3.3. 可矿化碳(Potentially Mineralizable Carbon)

微生物分解有机物质过程中,每单位微生物量产生的 CO_2 量为可矿化碳,又称为生物可降解碳。在低值时,它可反映出稳态土著性微生物区系的活性,在高值时,可反映发酵微生物区系的活性,可用于评估土壤微生物活性[17]。PMC 的测定方法比较多,如熏蒸培养法、直接镜检法、底物诱导呼吸、三磷酸腺苷分析法、以及熏蒸提取法等等[18]。在实验室中,常用氯仿熏蒸提取法,实验操作:称取一定量的土壤样品放入密封容器中,样品称取前需过 2 mm 筛,并保持田间持水量,约为百分之五十,在有氧环境下,室温培养 7 天,而后在容器中放入装有 0.1 mol/L NaOH 溶液的烧杯,以吸收二氧化碳,培养一段

时间后取出烧杯,用稀盐酸进行滴定,而后计算出 PMC 含量[19] [20] [21] [22]。每次取出烧杯后又换上新的 NaOH 碱液培养。

3.4. 轻组有机碳(Light Fraction Organic Carbon)

土壤中相对密度低于 2.0 g/cm^3 的组分称为轻组有机碳。通常认为土壤经过一定程度的分散或完全分散后,在密度为 $1.2\sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ 的液体中,用浮选法分离得到的有机物质为轻组,主要包括处于不同分解阶段的植物残体、微生物、小的动物,周转速率较高、碳氮比较高相对密度显著低于土壤矿物。主要是游离态的有机质,含有 76%~96% 的活性有机质。LFC 的变化可以指示土壤肥力的变化,与土壤呼吸速率、土壤矿化碳和微生物量氮等呈显著正相关,潜在生物活性较高,能体现土壤碳的活性[23]。

测定方法:在离心管中放入 40 mL 1.7 g/cm^3 的碘化钠悬浮液,称取 10 g (过 0.25 mm 筛)土壤样品于离心管中,继而用 10 mL 碘化钠溶液清洗离心管,静置后离心 20 min,将表层液体过 0.45 微升的滤膜,同时用去离子水洗涤至滤液为无色,然后将 0.45 μm 膜上的成分转移至铝盒中烘干(120°C),此组分为 LFOC,最后用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定[24]。

3.5. 易氧化有机碳(Labile Organic Carbon)

LOC 是指能够被 333 mol/L 的高锰酸钾溶液氧化的有机碳,其土壤有机碳中属于不稳定的一类,周转时间较短,而且是植物营养的主要来源,也被叫做土壤活性有机碳[25]。高锰酸钾能氧化氨基糖、氨基糖简单糖类、等有机碳,但是纤维素却不能被它氧化。

测定 LOC 的 KMnO_4 氧化法:1) 自然风干土壤样品过 0.25 mm 筛;2) 在三支离心管中称入三份每份大约含有 15 mg 碳壤样品,然后加入 25 mL 333 mol/L 高锰酸钾溶液振荡 1 h (25°C , 25 r/min),空白对照一起进行;3) 振荡后离心 5 min (离心管转速为 2000 r/min),取上清液用去离子水以 1:250 稀释;4) 在 565 nm 波长下,使用分光光度计测定稀释液吸光度,其标准液的浓度必须包含 1 mg 碳;5) 以 KMnO_4 的消耗量,计算出样品的 LOC 含量[26] [27]。

4. 土壤活性有机碳库含量的影响因素

4.1. 水分和湿度

土壤有机碳损失的途径很多,其中水溶性有机碳(*Water Soluble Organic Carbon*)的淋失很重要的一个途径。对森林土壤来说,随着淋溶过程次数的增多,土壤中淋洗出来的 WSOC 总量增加,随着温度的升高,土壤中淋洗出的 WSOC 的量也增加。冻融过程和淹水处理能增加土壤中 WSOC 的淋溶损失,淋溶物主要是低分子量的有机质中,表明冻融过程和淹水处理都能够增加土壤中的 WSOC 含量。降雨量特别少的年份采集的土壤样品中,WSOC 的含量比其它年份增加约 33%,上涨幅度与每年施 $\text{N}175 \text{ kg/hm}^2$ 的有机肥料基本一致[23]。在湿样品中,随 H_2O 含量增加,活性有机碳组分产生量也增加。风干过程对测定结果有一定的明显影响,该过程中活性有机碳析出为固体,而且此过程不可逆,因此使得活性有机碳含量降低。对比干样和湿样,干样中测得的结果远远低于湿样。研究表明,风干褐土和棕壤样品活性有机碳实测值要低 60.2%和 17.3%于新鲜样。红壤新鲜样品含水量很低(6%),风干过程对于实验结果的影响相对较小。但是也有研究表明[26],不管烘干还是风干均可使活性有机碳浓度上涨,并且风干的要比烘干的小。

4.2. 温度和季节

在 4°C 时,对活性有机碳浓度不产生任何影响,与新鲜样品中浓度相同[28]。低温或水分不适当所造成的缺氧,都会使微生物的活动受到限制,使土壤 WSOC 积累含量较高,土壤有机质分解的最佳温度是

25°C~55°C。

研究表明[29]供试土壤溶液中活性有机碳会随季节变化而变化,无论是针叶林还是阔叶林,不管是非根圈土还是根圈土溶液中活性有机碳含量都会有变化,其变化为:夏季 < 春季 < 秋季 = 冬季。在非根圈土溶液中平均含量可达夏季的百分之一到百分之两百。王连峰等[30]测得庐山酸沉降影响下 WSOC 浓度为 150~700 mg/kg,且因植物生长期、活动和季节变化而不同。Mcdowell 等[31]同时测得土壤中活性有机碳浓度变化最低的季节为夏季。

4.3. 土地利用方式

Moore [7]和 McDowell [31]等经研究发现,采伐森林过后土壤活性有机碳的含量基本没有变化。徐秋芳等[28]的研究表明,土壤 WSOC 含量杉木林的要低于毛竹林,毛竹林大于马尾松林的含量,马尾松也低于阔叶林以及杉木林的。姜培坤等[32]的研究指出,因为雷竹林地增温覆盖措施,增加了活性有机碳的量,且连续覆盖五年的比一年的上涨一倍。

4.4. 土地管理措施

4.4.1. 耕作

耕种措施会使得作物残体和土壤的接触较为充分,并且作物残体分解速度比表层覆盖更大,由此对土壤中的活性有机碳有很大的影响。张金波等[33]的研究表明,土壤中的活性碳含量,会跟随土地利用的变化,同时也会发生显著变化,土壤活性有机碳含量降低的因素很多,其主要是因为土地的开垦耕作。自然土壤耕向农田土壤后发生转变,使土壤活性有机碳含量显著减小,耕作年数的增长,减少的趋势也就会更加明显[34]。

4.4.2. 土壤 pH 值

在一定的土壤 pH 值范围内,土壤中活性碳含量和 pH 值是呈线性负相关的。在 pH 值较高时,活性有机碳更容易移动,并且石灰的施用,也会使得微生物的活性得以提高,也使得含量增加。但也有研究[33]表明,使用石灰对活性碳含量无明显影响,或者就是使其含量减小。另一方面,长期施用氯化钾、普钙、硫酸铵等酸性、生理酸性肥料后,使得土壤的 pH 值降低,造成微生物的生命活动减弱,并且活性碳的含量减少。

5. 土壤活性有机碳的生态环境意义

5.1. 土壤活性有机碳与土壤养分的关系

土壤活性有机碳对调节土壤养分具有重大影响,与土壤内在的生产力关系密切。土壤生物量碳、LOC、土壤碳素和 PMC 有效率与土壤有机质、全 N、全 P、全 K、碱解 N、速效 N、速效 P、速效 K、pH 值呈显著或极显著关联。同时,土壤活性有机碳对调节阳离子矿物风化、淋洗、酸性阴离子的吸附-解吸、土壤微生物活动、和其它土壤生物学、化学、以及物理过程意义重大,而且它是联系地球化学循环、水域生态系统元素和陆地的重要环境化学物质[35]。

5.2. 土壤活性有机碳对土壤中重金属行为的影响

作为重金属的有机配体的土壤中活性有机碳,对土壤溶液中的微量重金属的迁移过程、可移动性和金属复合物的形成起到了不可忽视的重要作用。它们通过与土壤、水体以及沉积物中的氧化物、矿物、金属离子以及有机物之间的絮凝、离子交换、氧化还原、络合、螯合和吸附等一系列反应,从而使重金属的迁移转化规律发生改变、最终归宿与金属毒性。通过李淑芬等[34]研究表明,由于有机质层淋溶液中

含有很多含量的活性有机碳成分，有机质层的淋溶液以及森林生态系统中的枯枝落叶层对土壤金属元素具有较大的解吸作用，并且和土壤里的活性羟基 Al、有机络合态 Fe、有机络合态 Al 之间呈明显的正相关。黄泽春等[36]研究表明，有机肥的活性有机碳能明显抑制土壤对铜、镉的吸附作用，并且在较大 pH 值条件下，这种抑制表现更加突出，但在有些情况下并不明显，并且有可能导致负效应。在 Cu 污染砂性土壤上施入泥炭，使得铜的毒害降低明显。但是，施绿肥和猪粪的土壤上，Cu 的毒害作用反而加大，其中不可低估活性有机物的作用。同时，土壤溶液中的活性有机碳也会在液、固之间分配，并且会很快被土壤吸附，通常使得土壤中活性有机碳浓度减小，在几小时后就会达到平衡。在土壤形成的过程之中，土壤矿物强烈吸附活性有机碳，其酸性基团与金属发生络合作用，进而使矿物的风化作用受到影响[37]。

5.3. 土壤活性有机碳对温室气体排放的影响

微生物生长的速效基质是土壤活性有机碳，其含量大小对土壤微生物的活性产生直接影响，从而温室气体的排放也受到影响。其含量与甲烷产生量关系密切，增加淹水土壤活性有机碳含量，可以使 CH₄ 生成量提高。当施用尿素于种植的水稻时，甲烷、二氧化氮的排放量增加，其原因是尿素的施用，使得水稻植株的生长得到促进，活性有机碳增多，CH₄ 细菌和 NO₂ 产生的相关细菌的活性提高，以及植株渗出更多的根分泌物，同时，也提供了更多的 CH₄ 基质，故 N₂O 和 CH₄ 排放量增大了[34]。

5.4. 土壤活性有机碳对水体的影响

土壤有机碳损失的重要途径是 WSOC 的淋失。流动水中带有活性有机碳是水生物代谢和流体化学受到陆地生态系统影响的一个很重要的一个方面，溪流和土壤中活性有机碳含量的增加对水质的影响极具重要。土壤活性有机碳中易被氧化的化合物，可以充当生物和化学的所需氧化生物，从而水中氧浓度减小[34]。

6. 展望

活性有机碳可以更实际、准确地反映土壤物理性质以及土壤肥力的变化，也可作为各种有机物的矿化率的指示，评价各种耕作方式对土壤质量的影响，指示土壤的综合活力水平，为农业的可持续发展提供理论依据，成为了陆地生态系统中碳移的热点问题。目前，活性有机碳的研究在国内外虽多，但是在土壤有机碳库的数量和动态变化过程的研究方面，还有很大的不确定性因素，虽然在土壤活性有机碳的影响因素方面的研究已经有很多，但这些研究大都只是在阐述定性方面，或者只是考虑局部因素影响，从而使得对土壤活性有机碳源和汇，以及动态过程的了解不够深入，这样也制约着对碳收支系统评估中的准确性。由于具有复杂性的土壤活性有机碳库在研究方法上具有不统一性，使得不同方法研究出的结果相互之间不能进行较为准确的比较，因此，对土壤活性有机碳研究的未来预测研究关键部分为：1) 组分准确化，并对其状态、过程进行定量描述；2) 测定方法需得到进一步完善，使其加强方法间的可比性、依据性、规范化、系统化；3) 加强形态研究，应用先进仪器精确地研究它的结构与形态；4) 加强土壤活性有机碳、氮沉降的影响、土壤养分循环与可持续发展之间的适用性方面研究；5) 重视土壤活性有机碳内部变化的研究；6) 固有的模型不能有效地反映其综合因素对土壤活性有机碳产生的影响，光靠动态模型固有的模型是不行的，这样反映土壤活性有机碳变化内在机理过程及其对环境响应的关键问题是较为困难的；7) 加强土壤活性有机碳与温室气体的排放、水体富营养化等之间关系的探索与研究；8) 在测定时可以根据不同的土地管理措施选择合适的分组方法。

基金项目

国家自然科学基金项目(31360503, 41361064); 贵州省普通高等学校特色重点实验室建设项目(黔教合

KY 字[2016]001); 贵州大学研究生教育创新基地建设项目(贵大研 SJJJ[2015]004)。

参考文献

- [1] Batjes, N.H. (1996) The Total C and N in Soils of the World. *European Journal Soil Science*, **47**, 151-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>
- [2] Fayez, R. and Ali, B. (2015) Soil C Turnover, Microbial biomass and Respiration, and Enzymatic Activities Following Rangeland Conversion to Wheat-Alfalfa Cropping in a Semi-Arid Climate. *Environmental Earth Sciences*, **72**, 5073-5088.
- [3] Needelman, B.A., Wander, M.M., Bollero, G.A., et al. (1999) Interaction of Tillage and Soil Texture: Biologically Active Soil Organic Matter in Illinois. *Soil Science Society of America Journal*, **63**, 1326-1334. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351326x>
- [4] 郭振, 王小利, 段建军. 土壤活性有机碳的监测及在土地管理中的应用[J]. 山地农业生物学报, 2017, 36(4): 55-63.
- [5] 宇万太, 马强, 赵鑫, 等. 不同土地利用类型下土壤活性有机碳库的变化[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2013-2016.
- [6] Shen, H., Cao, Z.H. and Hu, Z.Y. (1999) Characteristics and Ecological Effects of the Active Organic Carbon in Soil. *Chinese Journal of Ecology*, **18**, 32-38.
- [7] Moore, T.R., Souza, W.D. and Koprivnjak, J.F. (1992) Controls on the Sorption of Dissolved Organic Carbon by Soils. *Soil Science*, No. 2, 120-129. <https://doi.org/10.1097/00010694-199208000-00005>
- [8] 张国, 曹志平, 胡婵娟. 土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1921-1930.
- [9] 李振高. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 322-343.
- [10] 罗小三, 仓龙, 郝秀珍, 等. 原位土壤溶液采样及可溶性有机碳(DOC)的紫外吸收光谱直接测定探讨[J]. 土壤, 2007, 39(6): 943-947.
- [11] Murphy, D.V., Macdonald, A.J., Stockdale, E.A., et al. (2000) Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soils. *Biology and Fertility of Soils*, **30**, 374-387. <https://doi.org/10.1007/s003740050018>
- [12] 盛浩, 宋迪思, 王翠红, 等. 土壤溶解性有机碳四种测定方法的对比和转换[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1049-1053.
- [13] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 54-74.
- [14] 胡慧蓉, 马焕成, 罗承德, 等. 森林土壤有机碳分组及其测定方法[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 1018-1024.
- [15] 孙凯, 刘娟, 凌婉婷. 土壤微生物量测定方法及其利弊分析[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 1010-1016.
- [16] 张海燕, 张旭东, 李军, 等. 土壤微生物量测定方法概述[J]. 微生物学杂志, 2005, 7(25): 95-99.
- [17] 王晶, 谢宏图, 朱平, 等. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 109-112.
- [18] 王红, 范志平, 邓东周, 等. 不同环境因子对樟子松人工林土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1469-1475.
- [19] 刘云凯, 张彦东, 孙海龙. 干湿交替对东北温带次生林与落叶松人工林土壤有机碳矿化的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 213-222.
- [20] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 657-664.
- [21] 郝瑞军, 方海兰, 沈烈英, 等. 上海典型植物群落土壤有机碳矿化特征[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(5): 664-670.
- [22] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍. 苏南水稻土有机碳矿化特征及其与活性有机碳组分的关系[J]. 江流域资源与环境, 2010, 19(9): 1069-1074.
- [23] 郑红. 土壤活性有机碳的研究进展[J]. 中国林副特产, 2011(6): 90-94.
- [24] 胡海清, 陆昕, 孙龙. 土壤活性有机碳分组及测定方法[J]. 森林工程, 2012, 28(5): 18-22.
- [25] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 土壤有机碳分组方法概述[J]. 中国土壤与肥料, 2014(4): 1-6.
- [26] Logninow, W., Wisniewski, W., Strony, W.M., et al. (1987) Fractionation of Organic Carbon Based on Susceptibility to Oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, No. 20, 47-52.
- [27] Lefroy, R.D.B. (1993) Changes in Soil Organic Matter with Cropping as Measured by Organic Carbon Fractions and

- 13C Natural Isotope Abundance. *Plant and Soil*, **155**, 399-402. <https://doi.org/10.1007/BF00025067>
- [28] 徐秋芳, 姜培坤. 不同森林植被下土壤水溶性有机碳研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 8-11.
- [29] 曹建华, 潘根兴, 袁道先, 等. 岩溶地区土壤溶解有机碳的季节动态及环境效应[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 224-229.
- [30] 王连峰, 潘根兴. 酸沉降影响下庐山森林生态系统土壤溶液溶解有机碳分布[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1): 29-34.
- [31] McDowell, W.H. (1998) Effects of Chronic Nitrogen Amendments on Production of Dissolved Organic Carbon and Nitrogen in Forest Soil. *Water Air Soil Pollution*, **105**, 175-182. <https://doi.org/10.1023/A:1005032904590>
- [32] 姜培坤, 徐秋芳, 杨芳. 雷竹土壤水溶性有机碳及其与重金属的关系[J]. 浙江林学院学报, 2003, 20(1): 8-11.
- [33] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 土地利用方式对土壤水溶性有机碳的影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(3): 343-347.
- [34] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 土壤溶解有机碳的研究进展[J]. 土壤与环境, 2002, 1(4): 422-429.
- [35] 孟凡乔, 吴文良, 辛德惠. 高产农田土壤有机质、养分的变化规律与作物产量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 370-374.
- [36] 黄泽春, 陈同斌, 雷梅. 陆地生态系统中水溶性有机质的环境效应[J]. 生态学报, 2002, 22(2): 259-269.
- [37] 沈宏, 曹志宏, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32-38.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7255, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjss@hanspub.org